我国大陆红火蚁不同等级和虫态过冷却点的测定

陈浩涛, 罗礼智*, 江幸福
(中国农业科学院植物保护研究所,国家病虫害生物学重点实验室,北京 100193)

摘要: 为了解我国红火蚁 *Solenopsis invicta* Buren 的耐低温能力并为其风险分析提供科学依据,本文对采自我国 4 个地点红火蚁蚁群中不同等级和虫态的过冷却点,以及不同季节和室内不同饥饿程度的工蚁过冷却点进行了测定。结果表明:蚁群中不同等级和虫态的过冷却点差异显著。工蚁成虫的过冷却点(–11.8 ±0.4℃)显著低于有翅雌蚁(–8.1 ±0.6℃)及蚁后(–7.9 ±0.5℃),工蚁蛹和幼虫的过冷却点分别为 –13.6 ±0.3℃和 –12.1 ±0.4℃,蚁后蛹和幼虫的分别为 –13.3 ±0.3℃和 –12.2 ±0.3℃。工蚁蛹的过冷却点均显著低于其成虫和幼虫。蚁后蛹与其幼虫的过冷却点没有显著差异,但与其成虫的差异显著。同一未成熟期不同等级之间的也没有显著差异;不同季节的工蚁过冷却点有显著差异,其中以春季的最高(–4.3 ±0.2℃),夏季(–6.6 ±0.2℃)、秋季(–9.4 ±0.1℃)的次之,冬季的(–12.0 ±0.3℃)最低;深圳、珠海、广州和陆川 4 个地理种群的工蚁过冷却点在春、秋和冬季无显著差异,但夏季陆川种群的过冷却点显著低于其他 3 个种群的($P<0.05$)。饥饿可使工蚁的过冷却点明显升高,但大工蚁的过冷却点较小工蚁升高的幅度更大,饥饿 15 d 后的大工蚁比饥饿前的过冷却点升高了 7.0℃,而小工蚁仅升高了4.9℃。这些结果为评价红火蚁在我国潜在的传播风险提供了理论依据。

关键词: 红火蚁; 耐寒性; 过冷却点; 等级; 虫态; 地理种群; 季节; 饥饿; 中国
中图分类号: Q968.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 0454-6296(2009)05-0502-07

Determination of the supercooling points of various castes and developmental stages of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) in mainland China

CHEN Hao-Tao, LUO Li-Zhi*, JIANG Xing-Fu (State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: The red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren, is a social insect pest found recently in mainland China. To elucidate the cold hardness and provide basis for its risk assessment in mainland China, the supercooling points (SCPs) of various castes and individuals of various developmental stages collected from different geographical locations, seasons and durative starvations treatment were examined. The results indicated that the SCPs of fire ants differed significantly among castes and developmental stages. The worker ants had significant lower SCPs (–11.8 ±0.4℃) than those of female alates (–8.1 ±0.6℃) and queens (–7.9 ±0.5℃). The SCPs of the pupae and larvae of workers and queens were –13.6 ±0.3, 12.1 ±0.4, 13.3 ±0.3 and 12.2 ±0.3℃, respectively. Worker pupae had lower SCPs than worker adults and worker pupae. There was no significant difference between queen larvae and its pupae. At the same immature stage, SCPs of various castes did not differ from each other. The SCPs were not significantly different in workers collected from different geographical locations of Luchuan, Guangzhou, Zhuhai and Shenzhen in spring, autumn and winter except those collected in summer, when workers in Luchuan had remarkable lower SCPs than other locations ($P<0.05$). SCPs of worker ants decreased as the season progressed, with the highest for spring (–4.3 ±0.2℃), the second for summer (–6.6 ±0.2℃), and third for autumn (–9.4 ±0.1℃) and lowest (–12.0 ±0.3℃) for winter colonies. The SCPs of worker ants increased greatly by a durative starvation for 15 d. The SCPs of major workers and minor workers increased 7.0℃ and 4.9℃, respectively during the starvation test, suggesting that the major workers are less resistant to starvations than the minor

基金项目: 国家科技支撑课题(2005BA529A06);国家科研院所研究专项(2005DIB4J034);农业部财政专项(2130108)
作者简介: 陈浩涛, 男,博士研究生,1976 年生,主要从事昆虫生态学研究, E-mail: haotaochen@sina.com
*通讯作者 Author for correspondence, Tel.: 010-62815620; E-mail: lzluo@ippcaas.cn
收稿日期 Received: 2008-11-03; 接受日期 Accepted: 2009-02-27

workers. These results will support theoretically for risk analysis of *Solenopsis invicta* potential disperse in China.

Key words: *Solenopsis invicta*; cold tolerance; supercooling point; castes; developmental stage; geographical colonies; season; starvation; China

红火蚁 *Solenopsis invicta* Buren(膜翅目:蚁科)原产于南美洲巴拉那流域(Buren *et al*., 1974)。红火蚁于1930 年前后传播到美国,现已分布到 13 个州,发生面积已经达到 1.28 亿公顷(Callcott and Collins, 1996)。2000 年后红火蚁先后在澳大利亚、我国台湾、广东、广西、湖南和福建等地相继发现。在已建立永久种群的地方,红火蚁对当地的人身安全、生物多样性、经济发展和农业生产造成了巨大的威胁(罗礼智,2005;Zhang *et al*., 2007)。因此,研究和确定其发生危害的潜在范围,为制定正确的检疫措施提供科学依据一直是国内外红火蚁研究的重点之一(Korzukhin *et al*., 2001;Morrison *et al*., 2004;Sutherst and Maywald, 2005; 薛大勇等,2005)。

耐低温能力是限制红火蚁向北分布的重要因子,而过冷却点的高低通常是昆虫耐低温能力强弱的反映(Morrill *et al*.,1978, 1993),因此,国外对红火蚁过冷却能力的研究十分重视。目前已经研究过不同等级、虫态(Francke and Cokendolpher, 1986; Taber *et al*., 1987;Diffie and Shepard, 1989)及工蚁大小(Shannon *et al*., 2002; Abigail *et al*., 2005)过冷却点的差异,以及地理纬度、季节变化、和低温等对过冷却点的影响(James *et al*., 2002; Shannon *et al*., 2002; Abigail *et al*., 2005)。但这些研究在取得了重要进展的同时,也引出了不少问题和争议,如过冷却能力对于红火蚁的进化与适应是否有意义,环境胁迫尤其是低温是否可以诱导其过冷却点下降,地理纬度的高低是否会影响其过冷却点的变化等。这些问题的研究和解决无论是对于了解红火蚁过冷却点的变异规律,还是对于了解其进化与适应中的作用都具有十分重要的意义。

我国大陆发现红火蚁不到 5 年,目前尚未见到红火蚁过冷却点或耐低温能力的相关报道。我国大陆红火蚁不同等级或不同虫态的过冷却点是否一致,不同地理纬度或季节中的过冷却点是否会有差异,以及过冷却点能否作为确定其分布北界的指标等问题都没有明确。鉴于此,本文在测定了不同等级、虫态的过冷却点的同时,分析了不同季节、地点,以及饥饿对工蚁过冷却点的影响,并对这些结果产生的原因及应用价值进行了讨论。

1　材料与方法

1.1　虫源采集与处理

1.1.1　虫源采集:采样时主要选择较大的蚁巢挖掘,并快速将蚁巢铲入 120 L 的大塑料缸中,采用滴水法分离土壤中的蚁群(Banks *et al*.,1981)。这样可以保证获得不同虫态、不同等级且数目尽可能多的供试虫体。将分离的单个蚁群放入塑料容器(20 cm×16 cm×10 cm)中保存备用。为了尽可能地减少蚁群之间的误差,或增加蚁群的代表性,每个样点所采集的蚁巢为 10 个。每个蚁群中分别选择相应等级或虫态的 2 个个体进行过冷却点测定,因此结果中每个数据至少是 10 个蚁群 20 个个体的平均值(采集相关信息见表 1)。

1.1.2　不同等级和虫态的过冷却点测定:为了明确红火蚁蚁群中不同等级和虫态的抗寒能力,对蚁群中有翅雌蚁、蚁后和工蚁成虫,及它们的末龄(4 龄)幼虫和蛹的过冷却点进行测定。各级成虫的区分主要是按照高艳和罗礼智(2005)的标准进行。工蚁和蚁后的幼虫和蛹的区分参照 Petralia 和 Vinson(1979)的标准进行。实验于 2006 年 12 月 –2007 年 1 月在广西陆川进行。

表 1　用于测试过冷却点的红火蚁种群的地理位置及采集期间(月)的平均温度

Table 1　The mean temperatures and geographical locations for *Solenopsis invicta* colonies collected for the supercooling point test

地点 Location	地理位置(东经,北纬) Geographical locations (E,N)	取样月份平均气温(℃) Monthly mean temperature of the sampled months			
		2006-03	2006-07	2006-10	2007-01
广州 Guangzhou	113°33′, 22°48′	18.9	30.8	25.4	13.9
广东深圳 Shenzhen, Guangdong	113°49′, 22°43′	18.7	28.2	24.7	14.4
广东珠海 Zhuhai, Guangdong	113°34′, 22°22′	19.1	28.8	25.6	14.5
广西陆川 Luchuan, Guangxi	110°15′, 22°21′	16.8	28.6	23.7	12.3

1.1.3 不同地点及季节工蚁过冷却点的测定:由于我国大陆的红火蚁主要分布在广东、广西、湖南和福建。而张家界虽然是我国红火蚁目前分布的最北界(110°25′E, 29°13′N),但由于蚁群数量较少未能采集到足够的样本。为此,本文仅测定了采自广东广州、珠海、深圳和广西陆川4个地理种群过冷却点。样本采集的时间从2006年3月开始到2007年1月结束。样本具体的采集时间分别为3月17－25日、7月9－20日、10月21－30日以及2007年1月2－12日。这4个时间段依次确定为春季、夏季、秋季和冬季。用于测定过冷却点的等级为大、小工蚁成虫。每次每地采集的蚁群也是10个。

1.1.4 饥饿对大、小工蚁过冷却点的影响:将采回的蚁群连土转入塑料盒(27 cm×20 cm×18 cm)中,盖上盖子。置于室内于室温(3～8℃)的条件下保存。在饥饿期间仅供蒸馏水以保证土壤湿度,不提供任何食物。具体的测定时期为:第0(样本采回的当天),5,10和15 d。大工蚁和小工蚁用体视显微镜按Porter和Tschinckel(1987)的标准进行区分:头宽≥0.9 mm为大工蚁,头宽≤0.65 mm为小工蚁。实验于2006年12月－2007年1月在广西陆川完成。

1.2 过冷却点测定

红火蚁过冷却点的测定主要参考秦玉川和杨建才(2000)的方法进行。测定仪器为数字万用电表、热敏电阻(深圳市多一电子有限公司,型号:DY3103)和低温冰箱。测定时将单头虫子置于0.5 mL塑料离心管管尖,用棉花填塞管口,并使供试虫体与热敏电阻(探头)充分接触,然后将塑料管连同热敏电阻置于20 cm×16 cm×9 cm泡沫塑料盒内,盒内四周填塞棉花,降温速率1℃/min。数字万用电表通过探头连接到低温冰箱(－30℃)。测定时确保冰箱温度降至－20℃以下。当被测定的虫体内结冰时,潜热的释放会导致虫体温度骤然回升,此时万用表上反弹前显示的数值即为测试个体的过冷却点数值。所有样本的过冷却点测量在采集后的72 h内完成。

1.3 数据统计分析

数据表示为平均数±标准误。工蚁饥饿前和饥饿后15 d的过冷却点变化的频次分布特征采用单样本Kolmogorov-Smirnov检验分析。单向ANOVA比较蚁巢不同等级、发育阶段红火蚁的过冷却点。4地四季工蚁过冷却点的比较,以及饥饿状态下大小工蚁过冷却点的变化趋势用Univariate过程进行分析。统计过程中的多重比较采用Duncan氏新复极差法($P<0.05$)进行。所有数据分析采用SPSS 13.0 for Windows(SPSS Inc., 2004)软件完成。

2 结果

2.1 不同虫态和等级红火蚁的过冷却点

对蚁群中工蚁、有翅雌蚁和蚁后以及它们的幼虫和蛹的过冷却点的测定结果(图1)表明:工蚁蛹(－13.6±0.3℃)和雌蚁蛹(－13.3±0.3℃)的过冷却点最低,其次为雌蚁幼虫(－12.2±0.3℃),三者之间无显著差异。工蚁幼虫(－12.1±0.4℃)和工蚁成虫(－11.8±0.4℃)过冷却点稍高于前三者的,但只显著高于工蚁蛹的($P<0.05$);有翅雌蚁(－8.1±0.6℃)和蚁后(－7.9±0.5℃)的过冷却点最高,显著高于前述五者的过冷却点($P<0.05$),且有翅雌蚁与蚁后之间无显著差异。于是,工蚁成虫的过冷却点显著低于有翅雌蚁或蚁后的,而工蚁蛹的过冷却点显著低于其幼虫的($P<0.05$),而雌蚁蛹的过冷却点虽然也低于其幼虫,但差异不显著。工蚁成虫、有翅雌虫或蚁后的过冷却点均高于其幼虫或蛹的。

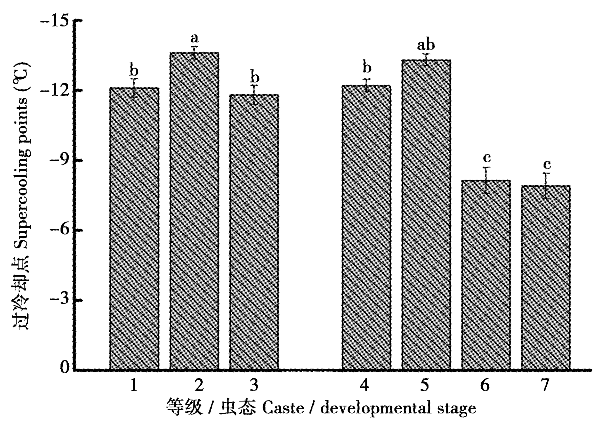


图1 蚁后、有翅雌蚁和工蚁及它们幼虫和蛹的过冷却点

Fig. 1 The SCPs of queen, female alate and worker and their larvae and pupae in *Solenopsis invicta*

1:工蚁幼虫 Worker larvae; 2:工蚁蛹 Worker pupae; 3:工蚁成虫 Worker adults; 4:雌蚁幼虫 Female larvae; 5:雌蚁蛹 Female pupae; 6:有翅雌蚁 Female alates; 7:脱翅雌(蚁后) Female dealates. 图中数据为平均数±标准误,柱上不同字母代表Duncan氏多重比较差异显著($P<0.05$);下图同。Data are presented as mean ± *SE*. Bars sharing the different letters are significantly different at the 5% level by Duncan's multiple range test. The same for the following figures.

2.2 不同地点、季节工蚁过冷却点

对4个地理种群工蚁过冷却点进行测试的结果(表2)表明,除了夏季陆川工蚁的过冷却点显著低于其他3个地点的之外($P<0.05$),其他任何两个地理种群在同一季节内的过冷却点均没有显著差异。

表 2　我国大陆四地不同时间采集的红火蚁工蚁过冷却点

Table 2　Supercooling points of *Solenopsis invicta* workers collected from different seasons and geographical locations in mainland China

地点 Location	取样时间(月-日)Collecting date (Month-day)			
	03-17 – 03-25	07-9 – 07-20	10-21 – 10-30	01-02 – 01-12
广州 Guangzhou	−4.5 ±0.20 a	−6.3 ±0.25 a	−9.4 ±0.11 a	−11.8 ±0.41 a
广东深圳 Shenzhen, Guangdong	−4.5 ±0.16 a	−5.6 ±0.34 a	−9.4 ±0.14 a	−12.3 ±0.43 a
广东珠海 Zhuhai, Guangdong	−4.3 ±0.21 a	−6.4 ±0.33 a	−9.5 ±0.16 a	−12.1 ±0.40 a
广西陆川 Luchuan, Guangxi	−3.9 ±0.14 a	−8.0 ±0.29 b	−9.2 ±0.14 a	−11.7 ±0.44 a

表中数据为平均数 ± 标准误；每列数据中的不同字母表示 Duncan 氏多重比较差异显著($P < 0.05$ 水平)。Data in the table are presented as mean ± *SE*. Means in the same line sharing the different letters are significantly different at the 5% level by Duncan's multiple ranging test.

对 4 个地理种群 4 个季节的工蚁过冷却点进行测定的结果表明,工蚁的过冷却点存在显著的季节性差异(P < 0.05)。4 个地理种群中任何一个的工蚁过冷却点都遵循着春、夏、秋、冬依次降低的规律(表 2)。4 个地理种群每个季节的平均过冷却点也是遵循着春季最高(−4.3 ±0.2℃)、夏季次之(−6.6 ±0.2℃)、秋季更低(−9.4 ±0.1℃)、冬季最低(−12.0 ±0.3℃)的顺序(图 2)。而且任何两个季节的工蚁过冷却点差异均达到显著水平($P < 0.05$)。

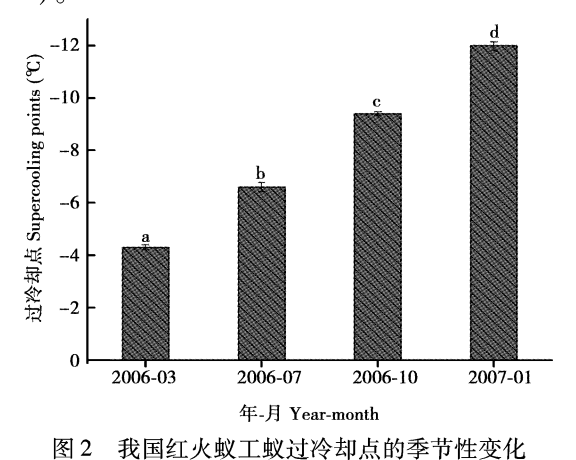


图 2　我国红火蚁工蚁过冷却点的季节性变化

Fig. 2　The variation in SCPs of *Solenopsis invicta* workers collected in different seasons in mainland China

2.3　饥饿对工蚁过冷却点的影响

饥饿对工蚁的过冷却点有显著的影响。虽然饥饿前和饥饿 15 d 后的工蚁过冷却点均服从正态分布,但从饥饿处理前后工蚁个体过冷却点数值分布范围(图 3)来看,不仅工蚁的过冷却点明显升高,而且过冷却点的分布范围和极值都产生了较大的变化:饥饿前工蚁的过冷却点分布范围为 −14.7℃ ~ −8.6℃,最低值与最高值相差 6.1℃。饥饿 15 d 后工蚁过冷却点的分布范围为 −2.0℃ ~ −10.4℃,两极值之间相差 8.4℃。工蚁个体过冷却点分布范围较初始时加宽。

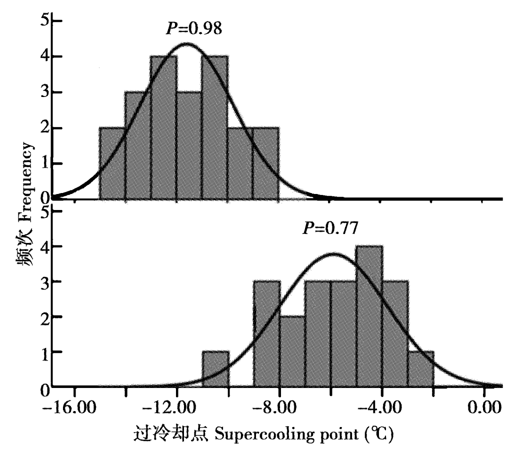


图 3　15 d 饥饿前(a)和后(b)红火蚁工蚁过冷却点的频次分布(3 ~ 8℃)

Fig. 3　Frequency distributions of SCPs in workers' of *Solenopsis invicta* before (a) and after (b) 15-day starvation at room temperature of 3 – 8℃

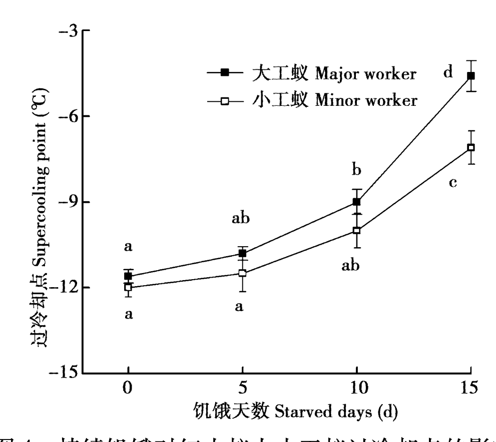


图 4　持续饥饿对红火蚁大小工蚁过冷却点的影响

Fig. 4　Effect of durative starvation on the SCPs of major workers and minor workers of *Solenopsis invicta*

所获的结果还表明,饥饿对工蚁过冷却点的影响还会因工蚁大、小的不同而异(图 4)。饥饿 5 d

时,大、小工蚁过冷却点仅升高了0.8℃和0.5℃,与饥饿前均无显著差异。到第10天,大工蚁的过冷却点(-9.0±0.4℃)与初始测定值已有显著差异($P<0.05$),而小工蚁的过冷却点(-10.0±0.6℃)与其前两个测定值仍没有显著差异。到第15天,大、小工蚁的过冷却点分别升高到-4.6±0.5℃和-7.1±0.6℃,均显著高于饥饿前的($P<0.05$)。另外,从饥饿开始到结束的15 d,大工蚁的过冷却点升高了7.0℃,而小工蚁的仅升高了4.9℃(图4)。

3 讨论

红火蚁起源于南美,属于热带昆虫(Buren *et al*., 1974)。同时,红火蚁还是一种土栖昆虫,蚁巢建在土内,蚁群可以根据气温变化在蚁巢上下部位运动从而避免了极端气温的影响(Morrill *et al*., 1978)。因此,红火蚁通常被认为是一种没有抵御严寒能力、不耐结冰,并以非休眠状态越冬的种类(Francke and Cokendolpher, 1986; Taber *et al*., 1987; Diffie and Shepard, 1989)。而我们的结果表明,红火蚁不仅具有一定的过冷却能力,并且还会因等级、虫态或发育阶段(图1,图4),所处的地理位置(表2)、季节(图2)以及饥饿状态(图3,图4)的不同而异。

蚁群中不同等级、虫态的过冷却点存在着显著的差异(图1)。在成虫中,工蚁过冷却点较繁殖蚁低,蛹的过冷却点较幼虫的低,幼虫和蛹的较成虫的低。这与Francke和Cokendolpher(1986)的研究结果基本一致。这些差异可能与每个等级在蚁群中的功能作用有关。如有翅雌蚁和蚁后过冷却点比工蚁的高,主要是因为它们仅需在蚁巢中产卵,而工蚁则担负着保卫蚁巢、外出觅食、照顾蚁后和幼虫以及清洁蚁巢等众多任务,因此较强的耐低温能力无论是对于工蚁本身的存活还是对于整个蚁群的发展都是有益的。另外,这些差异也可能与虫体本身的营养结构、体内化学物质组成有关(Leather *et al*.,1993; Kostal *et al*.,2001;Worland *et al*., 2006)。Tschinkel(2006)认为,红火蚁的过冷却现象可能是某种相关生理现象的副产品而并不一定具有适应意义。原因是:蛹的过冷却点是蚁群各类虫态中最低的,而在冬天则看不到蚁巢中有蛹存在。因此,要真正了解红火蚁各个等级或虫态的过冷却点差异产生的原因依然要做很多的工作。

在不同地理种群的工蚁中,除了7月陆川蚁群的过冷却点显著低于同期的另外3个地理种群之外,其他任何季节4个地理种群的过冷却点均无显著性差异(表2)。产生这种现象的可能原因是4个地理种群的纬度相差较小(相差不到1°),每个季节的温度也没有很大的差异(表1),因此,工蚁的过冷却点没有显著差异。但Abigal等(2005)发现来自纬度更高的种群其过冷却点反而较低。而陆川夏季种群过冷却点低于其他3个同季节地理种群的原因可能是陆川属亚热带季风气候,而广州、深圳和珠海属亚热带海洋季风气候。另外,陆川夏季种群的采样地点为垃圾场,而广东的3个样点均为绿化草地,也可能是导致陆川夏季种群的过冷却点不同于其他3个同季地理种群的原因。这主要是因为食物源的不同或者是生境压力的差异也会导致的过冷却点的不同(Leather *et al*., 1993;Abigail *et al*., 2005)。

大陆红火蚁工蚁过冷却点会随季节的不同而呈现有规律的变化:一年中会随春、夏、秋、冬的变化而逐渐降低,而且季节与季节之间的差异均达到显著水平(图2)。这些结果对于揭示红火蚁的季节性活动规律具有重要的意义。但值得注意的是,工蚁的过冷却点虽然会随季节的变化而异,但其与温度变化的关系并不十分密切,如在所研究的地理种群的4个季节中,春季的温度明显低于夏季和秋季的(表1),但工蚁的过冷却点则是最高的,而且4个地理种群的结果均为一致(表2)。这些结果表明,除了季节性的温度变化以外,工蚁本身的生理状态也会影响到其过冷却能力。因此,季节性的气温变化并非是影响红火蚁过冷却点产生变异的唯一因子。

饥饿对工蚁过冷却点的影响也十分显著。经过饥饿处理后的工蚁过冷却点大幅度升高,个体间的差异也在扩大(图3),表明饥饿降低了工蚁的抗寒能力,因而是影响红火蚁过冷却能力的主要环境因子之一。正常取食的大、小工蚁的过冷却点并没有显著差异,这与国外的一些研究结果类似(Shannon *et al*., 2002;Abigail *et al*., 2005)相似,但饥饿却可使大、小工蚁的过冷却点产生明显差异(图4):其中大工蚁的过冷却点提升较小工蚁快,这可能是由于大小工蚁在蚁群中的分工不同所造成的,如小工蚁是负责觅食,而大工蚁仅负责保卫蚁巢。也可能是由于大工蚁的个体较大,较小工蚁不耐饥饿,需要更多的能源物质来维持体内的正常生理活动而引起的。这些结果表明,食物在保证红火蚁越冬以及向北扩张的过程中起着十分重要的作用。

综上所述,红火蚁具有一定的过冷却能力,但会随成虫等级、发育阶段的不同而异,同时还会受到及

季节、地理环境以及食物的影响。过冷却点在一定程度上能够反映昆虫耐低温能力的强弱(Morrill *et al.*, 1978, 1993),但红火蚁的过冷却点是否与其抗低温能力相关目前还存在很多疑问。首先,影响红火蚁过冷却点的因子很多,而且多数是生理上的(James *et al.*, 2002; Shannon *et al.*,2002;Abigail *et al.*, 2005;Tschinkel, 2006);其次,红火蚁的过冷却点并非是由低温诱导的,高纬度地区的蚁群比低纬度地区的过冷却点低(Abigail *et al.*, 2005),以及春季的过冷却点高于夏季的(图 2)便是其中的例子;最后,红火蚁不一定需要过冷却能力,因为其可以通过移动到土层深处、聚集行为,蚁巢的选址等帮助其渡过冬天。为此,我们认为,由于影响过冷却点的强弱的因素较复杂,目前尚不能将过冷却点用作确定(我国)红火蚁分布北界的指标。

致谢 该项研究得到了广西陆川县农业局和植保站,广东省珠海市动植物防疫监督检验中心,广州市农业环境与植物保护总站和深圳市农业植物检疫站的支持和帮助,在此一并致谢!

参 考 文 献(References)

Abigail Q, Richard MK, Sherman AP, 2005. Supercooling of the red imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae) on a latitudinal temperature gradient in Texas. *The Southwest Naturist*, 50: 302 – 306.

Banks WA, Lofgren CS, Jouvenaz DP, Stringer CE, Bisho PPM, Williams DF, Wojcik DP, Glancey BM, 1981. Techniques for collecting, rearing, and handling imported fire ants. USDA, SEA, AATS-S-21.

Buren WF, Allen GE, Whitcomb WH, Lennartz, FE, Williams RN, 1974. Zoogeography of the imported fire ants. *J. N. Y. Entomol. Soc.*, 82: 113 – 124.

Callcott A-MA, Collins HL, 1996. Invasion and range expansion of imported fire ants (Hymenoptera: Formicidae) in North America from 1918 – 1995. *Florida Entomologist*, 79: 240 – 251.

Diffie SK, Sheppard DC, 1989. Supercooling studies on the imported fire ants: *Solenopsis invicta* and *Solenopsis richteri* (Hymenoptera: Formicidae) and their hybrid. *J. Entomol. Sci.*, 24: 361 – 364.

Francke OF, Cokendolpher JC, 1986. Temperature tolerances of the red imported fire ant. In: Lofgren CS, Vander Meer RK eds. Fire Ants and Leaf Cutting Ants: Biology and Management. Westview Press, Boulder, Colorado. 104 – 113.

Gao Y, Luo LZ, 2005. Antennal morphology and sensilla of the fire ants, *Solenopsis invicta* Buren invaded southern China observed with scanning electron microscopy. *Acta Entomol. Sin.*, 48: 986 – 992. [高艳, 罗礼智, 2005. 红火蚁触角形态及感受器的扫描电镜观察. 昆虫学报, 48(6): 986 – 992]

James SS, Pereira RM, Vail KM, Ownley BH, 2002. Survival of imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae) species subjected to freezing and near-freezing temperatures. *Environ. Entomol.*, 31: 127 – 133.

Korzukhin MD, Porter SD, Thompson LC, 2001. Modeling temperature-dependent range limits for the fire ant *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) in the United States. *Environ. Entomol.*, 30: 645 – 655.

Kostal V, Slachta M, Simek P, 2001. Cryoprotective role of polyols independent of the increase in supercooling capacity in diapausing adults of *Pyrrhocoris apterus* (Heteroptera: Insecta). *Comp. Biochem. Physiol. B*, 130: 365 – 374.

Leather SR, Walters KFA, Bale JS, 1993. The Ecology of Insect Overwintering. Cambridge University Press, Cambridge.

Luo LZ, 2005. Considerations and suggestions on managing the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren in China. *Plant Protection*, 31(2): 5 – 8. [罗礼智, 2005. 基于控制我国红火蚁危害的几点思考. 植物保护, 31(2): 5 – 8]

Morril WL, Gabor JW, Wichman D, 1993. Mortality of the wheat stem sawfly (Hymenoptera: Cephidae) at low temperatures. *Environ. Entomol.*, 22: 1 358 – 1 361.

Morrill WL, Martin PB, Sheppard DC, 1978. Overwinter survival of the red imported fire ant: Effects of various habitats and food supply. *Environ. Entomol.*, 7: 262 – 264.

Morrison LW, Porter SD, Daniels E, Korzukhin MD, 2004. Potential global range expansion of the invasive fire ant, *Solenopsis invicta*. *Biological Invasions*, 6: 183 – 191.

Petralia RS, Vinson SB, 1979. Developmental morphology of larvae and eggs of the imported fire ant, *Solenopsis invicta*. *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 72: 472 – 484.

Porter SD, Tschinkel WR, 1987. Foraging in *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae): Effects of weather and season. *Environ. Entomol.*, 16: 802 – 808.

Qin YC, Yang JC, 2000. A new simple method to test insect supercooling point. *Chinese Bulletin of Entomology*, 37(4): 236 – 238. [秦玉川, 杨建才, 2000. 一种便携式测定昆虫过冷却点的方法. 昆虫知识, 37(4): 236 – 238]

Shannon SJ, Roberto MP, Karen MV, Bonnie HO, 2002. Survival of imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae) species subjected to freezing and near-freezing temperatures. *Environ. Entomol.*, 31: 127 – 133.

Sutherst RW, Maywald G, 2005. A climate model of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae): Implications for invasion of new regions, particularly Oceania. *Environ. Entomol.*, 34(2): 317 – 335.

Taber SW, Cokendolpher JC, Francke OF, 1987. Supercooling points of red imported fire ants, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) from Lubbock, Texas. *Entomol. News*, 98: 153 – 158.

Tschinkel WR, 2006. The Fire Ants. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.

Worland MR, Leinaas HP, Chown SL, 2006. Supercooling point

frequency distributions in Collembola are affected by moulting. *Functional Ecology*, 20: 323 - 329.

Xue DY, Li HM, Han HX, Zhang RZ, 2005. A prediction of potential distribution area of *Solenopsis invicta* in China. *Chinese Bulletin of Entomology*, 42(1): 57 - 60. [薛大勇, 李红梅, 韩红香, 张润志, 2005. 红火蚁在中国的分布区预测. 昆虫知识, 42 (1): 57 - 60]

Zhang R, Li Y, Liu N, Porter SD, 2007. An overview of the red imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae) in mainland China. *Florida Entomologist*, 90(4): 723 - 731.

(责任编辑: 袁德成)